

文章编号: 0258-7025(2009)04-0873-06

基于啁啾光纤光栅的波长可调谐带通滤波器

姜 萌 张伟刚 金龙 刘长军 张 绮 刘亚萍 张春艳 刘 波

(南开大学现代光学研究所光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要 通过对长度 4 cm 带宽为 35 nm 的啁啾光纤光栅(CFG)施加横向的局部应力,啁啾光纤光栅的反射阻带中会形成一个或者若干个窄的透射窗口。窗口的位置随着施加应力的位置不同而变化,窗口的深度随着施加压力的大小和区域面积而变化,可以制作出波长可调谐的带通滤波器。3 dB 带通宽度为 0.2 nm,最小分辨率为 0.4 nm。建立了压力造成相移的物理模型,并用分段均匀的方法对啁啾光纤反射谱的改变进行数值模拟,得到了不同受力长度以及不同受力间隔的啁啾光栅反射谱。实验数据与数值模拟的结果相吻合。

关键词 光纤光学; 啁啾光纤光栅; 压力; 相移; 滤波器

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093604.0873

Wavelength Tunable Band-Pass Filter Based on Chirped Fiber Grating

Jiang Meng Zhang Weigang Jin Long Liu Changjun Zhang Qi
Liu Yaping Zhang Chunyan Liu Bo

(*Key Laboratory of Opto-Electronic Information and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

Abstract A 4-cm-long chirped fiber grating (CFG) with 35 nm bandwidth of reflected spectrum is studied with the exertion of local pressure on the fiber through the application of transverse force to a small grating section. One or several narrow transmission windows can be shaped in the reflected spectrum of the chirped fiber grating. Location and depth of the transmission window is changed with the induced pressure. A physical model is developed in order to estimate the phase shifts induced by pressure. Numerical simulation based on the piecewise-uniform approach is also used to calculate the consequent changes in reflected spectrum. Experimental and theoretical data are in good agreement.

Key words fiber optics; chirped fiber grating; local pressure; phase shifts; filter

1 引 言

单通道和多通道的宽带、高反射率的带阻滤波器及窄带、低损耗的带通滤波器是光纤网中重要的组成器件。利用光纤光栅制作的在线光纤滤波器具有成本低、与光纤兼容、易于集成等优点,是光纤通信系统中理想的器件。在光纤光栅的大家族里,莫尔光纤光栅或者相移光纤光栅作为一种通带滤波器^[1, 2],是通过直接阻止光谱带中某些频率的光而使特定频率的光通过。与之相比,布拉格光栅只有

与耦合器、环路器等器件联合使用才能实现其阻带滤波的功能。在高速率波分复用(WDM)传输系统中,还要求通带滤波器传输平稳、陡直、接近线性的相位响应以及近似于零的色散,而通过优化滤波器的相移大小、通道波长、通道间隔是可以达到以上要求的。由于它在 WDM 系统里的重要用途,因而倍受人们的青睐。

啁啾光纤光栅(CFG)由于具有很宽的带宽响应可以被设计用来进行散射补偿。目前啁啾光纤光栅

收稿日期: 2008-12-09; 收到修改稿日期: 2008-12-26

基金项目: 国家自然科学基金(10674075, 60577018, 10774077)、国家 863 计划(2006AA01Z217)、天津市自然科学基金重点项目(06YFJZJC00300)和中国博士后科学基金(20060400687)资助课题。

作者简介: 姜 萌(1982-),女,博士研究生,主要从事光子技术及光通信等方面的研究。E-mail: abobjm@gmail.com

导师简介: 张伟刚(1959-),男,教授,博士生导师,主要从事光子技术与现代光传感、新型光电子器件等方面的研究。

E-mail: zhangwg@nankai.edu.cn

的研究主要集中在光纤通信和光纤传感器等器件的研制方面,但是在光纤激光器^[3]、高阶色散补偿、放大自发辐射(ASE)抑制、放大器增益平坦、滤波器的研制等方面应用非常广泛。目前已经提出了多种方法来实现永久性的啁啾光栅或者可调谐的啁啾。最新的研究表明可以利用啁啾光栅带宽响应宽的优势写出啁啾莫尔光纤光栅、啁啾相移光纤光栅和取样啁啾光纤光栅等具有不同透射窗口的啁啾光栅。迄今为止,相对成熟的啁啾光栅写制技术是二次曝光法、相位掩模法以及紫外交叉相干光束技术等。啁啾莫尔光纤光栅是由两个啁啾布拉格光栅线性叠加而成的,一般采用拉伸和二次曝光相结合的方法在光栅中引入 π 相位点写制啁啾莫尔光栅,制作出带通滤波器。取样啁啾光栅一般采用在啁啾模板前面加一个取样模板来实现周期较大的光强度调制。取样啁啾光栅的缺点是反射率最大值随取样包络逐渐变化。相移啁啾光栅是用相位掩模板写制啁啾光栅的过程中,用定点后曝光的方法在光栅某处产生折射率不连续的相移点写制的。上述三种特殊的啁啾光纤光栅由于能在光栅发射谱中打开一个或者多个窄线宽的通道,在单频光纤激光器、解波分复用系统、放大器的增益平坦等方面具有很高的应用价值。但是也有它们的局限性,例如写制好的特殊啁啾光纤光栅的反射谱固定,通带间隔和位置不能任意改变。D. Uttamchandani等^[4]利用定点加热装置对布拉格光纤光栅进行后处理,在布拉格光纤光栅上产生了不同相移。C. J. S. de Matos等^[5]在布拉格光栅上施加局部横向应力,产生了不同的相移,在反射谱上实现了约400 MHz的透射窗口。

本文基于相位掩模法写制的啁啾光纤光栅,通过对啁啾光纤光栅的横向施加局部压力,引入了相

移,局部应力施加的位置不同,反射阻带的透射窗口的波长也不同,从而制作出通带可调谐的滤波器。

2 横向局部应变

在无外部应力条件下,理想光纤为各向同性介质的圆柱,其折射率分布为圆对称,无双折射现象。如果给光纤施加一个 y 方向的力学量(比如应力或应变、弯曲或微弯曲等)后,使光纤偏离理想的圆对称结构,光纤为各向异性,产生线性双折射,光栅栅格及纤芯折射率变化较复杂^[6~11]。如果假设光纤光栅仅受 y 方向的横向力 F ,且作用在光栅区域的长度为 l ,如图1所示,则对应 x, y 偏振的应力为

$$\sigma_x = \frac{F}{\pi bl}, \quad \sigma_y = -\frac{3F}{\pi bl}. \quad (1)$$

把这种因机械应力或应变引起晶体折射率发生改变,从而产生人工双折射的现象称为弹光效应。取 $l=10$ mm。考虑两种特殊的情况:平面应变和平面应力。平面应变可以认为光纤两端固定,平面应力被认为光纤两端是自由端。考虑一般的横向应变,实验中的横向应变更接近平面应力的 $\sigma_z = u \cdot v$ ($\sigma_x + \sigma_y$)。机械应力或应变对晶体折射率的影响可看作是对折射率椭球的微扰,可以用折射率改变量与应力之间的关系来描述弹光效应

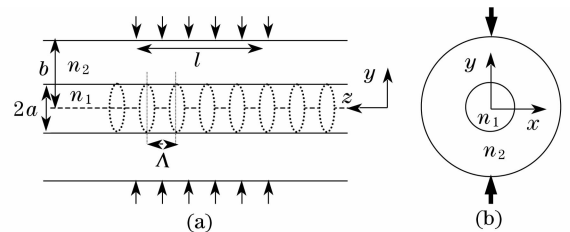


图1 对FBG施加横向力 F 示意图。(a)径向图;(b)横截面图
Fig. 1 Diagram of FBG imposed with transversal strain.

(a) along the fiber length; (b) cross section

$$\begin{cases} \Delta n_x = -n_x^3/2E\{(p_{11} - 2\nu p_{12})\sigma_x + [(1 - \nu)p_{12} - \nu p_{11}] \cdot (\sigma_y + \sigma_z)\} \\ \Delta n_y = -n_y^3/2E\{(p_{11} - 2\nu p_{12})\sigma_y + [(1 - \nu)p_{12} - \nu p_{11}] \cdot (\sigma_x + \sigma_z)\} \\ \Delta n_z = -n_z^3/2E\{(p_{11} - 2\nu p_{12})\sigma_z + [(1 - \nu)p_{12} - \nu p_{11}] \cdot (\sigma_x + \sigma_y)\}, \end{cases} \quad (2)$$

其中, E 为杨氏模量, ν 为泊松比, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别为 x, y, z 方向上的应力。对于平面应力及平面应变的情况, y 偏振方向的波长漂移量要远小于 x 偏振方向的波长,即 $\Delta\lambda_x > \Delta\lambda_y$,这是由于弹光系数 $p_{11} < p_{12}$ 造成的。

当光纤受到压力时,由于折射率和光纤长度的改变,光程就会随着变化。如果受到压力的区域存在FBG,那么这些作用就会带来本地相移使得反射波长发生了改变 $\Delta\lambda_B$ 。如果施加的应变不是各向同

性的,那么波长漂移量将会是偏振相关的。如果是啁啾光纤光栅,压力导致反射谱产生凹陷,通过检测反射谱的改变可以测量到作用在光栅不同位置的压力。相反,如果是光纤布拉格光栅,压力导致光栅分成两个准光栅,每一个要比原来的长度短,反射光在两段准光栅之间的相位关系可以由间隔确定。当引入的相位是 $\pi/2$ 发生不良的干涉,如果光栅折射率的调制振幅是对称的并且压力的作用点是它的有效

中心,那么这两段准光栅是相同的并且它的中心波长就会消失。这种不良干涉可以用来产生一个良好的透射机构,类似于分布反馈激光器。

当一个半径为 r 的圆柱形重物横向放置在光纤上时会引入相移,假设当施加外力时,光纤的体积保持不变,并且平行于压力作用方向的光纤尺寸的减少只是导致光纤长度和折射率的改变。如果压力施加在 y 轴方向,假设沿光纤轴向均匀的拉伸力施加在光纤的受压区域长度为 l ,由于圆柱形物体施加在光纤的作用力为 F ,由于啁啾光纤光栅的局部横向受力,可以假设 CFG 的两端固定,即: $\sigma_x = F/\pi bl$, $\sigma_y = -3F/\pi bl$, $\epsilon_z = 0$, $\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$,代入(2)式中,可以得到折射率改变量与应力之间的关系为

$$\begin{aligned} \Delta n_x &= -n_x^3/E\{[(1-\nu^2)p_{11} - (\nu+\nu^2)p_{12}]\sigma_x + \\ &[(1-\nu^2)p_{12} - (\nu+\nu^2)p_{11}]\sigma_y\}, \\ \Delta n_y &= -n_y^3/E\{[(1-\nu^2)p_{12} - (\nu+\nu^2)p_{11}]\sigma_x + \\ &[(1-\nu^2)p_{11} - (\nu+\nu^2)p_{12}]\sigma_y\}, \end{aligned} \quad (3)$$

并将 $E=6.9\times 10^{10}\text{ N/m}^2$, $\nu=0.17$, $p_{11}=0.113$, $p_{12}=0.252$ 代入(3)式可以进行简化,得到折射率变化量与施加应力 F 的表达式。

当啁啾光纤光栅的某一段受到局部横向压力时,可以用传输矩阵法模拟^[12~17]。当啁啾光纤光栅长度很短时, $L=0.015\text{ m}$,如下式所示可以将整个啁啾光栅看成三个小段啁啾光纤光栅。其中一段受到局部的横向压力,则整段啁啾光纤光栅的传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} R(-L/2) \\ S(-L/2) \end{bmatrix} = \mathbf{T}^1 \cdots \mathbf{T}^{S-1} \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix}^{\text{STRESS}} \times \mathbf{T}^{S+1} \cdots \mathbf{T}^N \cdot \begin{bmatrix} R(L/2) \\ S(L/2) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

解耦合模方程和传输矩阵单元可得

$$\begin{aligned} T_{11} &= \cosh(\gamma_B \Delta z) - i(\hat{\sigma}/\gamma_B) \sinh(\gamma_B \Delta z) \\ T_{12} &= -(k/\gamma_B) \sinh(\gamma_B \Delta z), \\ T_{21} &= (k/\gamma_B) \sinh(\gamma_B \Delta z), \\ T_{22} &= \cosh(\gamma_B \Delta z) + i(\hat{\sigma}/\gamma_B) \sinh(\gamma_B \Delta z), \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\hat{\sigma}$ 为平均的直流自耦合系数,定义为

$$\hat{\sigma} = 2\pi n_{\text{eff}}(1/\lambda - 1/\lambda_B) + \frac{2\pi}{\lambda} \overline{\Delta n} - \frac{1}{2} \phi'(z). \quad (6)$$

k 为交流耦合系数,对于单模反射光栅,可以简单定义为

$$k = \frac{\pi}{\lambda} \overline{\Delta n} \quad (7)$$

$\gamma_B = \sqrt{k^2 - \hat{\sigma}^2}$,将耦合模方程的特征值 λ_B 代入到公式(6)和(7)中求得 $\hat{\sigma}$ 和 γ_B 。根据反向传输光纤光栅的边界条件,可解得耦合模方程的数值解,即反射

振幅比,进而得到啁啾光纤光栅反射率 R 。

3 数值模拟

假设半径为 r 的圆柱形重物对光纤横向施加局部应力,那么原本圆柱形的光纤与圆柱形重物的横截面是边长为 $100\ \mu\text{m}$ 的正方形。假设受到压力的光纤区域体积不变,那改变的就是该受力处的光纤微元的长度 l 和折射率,可以推导出

$$\sigma_x = -\frac{1}{L} \sqrt[3]{1/16r(F/Y)^{2/3}} = -2\sigma_y z, \quad (8)$$

$$l = \sqrt{-16rL\epsilon_x}. \quad (9)$$

将公式(8)代入公式(3)中,可以得到 x 和 y 方向的折射率变化量,根据相移公式 $\Delta\phi = 2\pi n_{\text{eff}} l \cdot \Delta n/\lambda$ 可以求出由于局部压力造成的相移大小。其中 Δn 是相移区与非相移区的折射率差。代入公式(4)中即可以根据传输矩阵法计算出受横向局部应力作用的啁啾光纤光栅反射率。C. J. S. de Matos 等^[5]假设受到局部横向应力的微元受力是均匀的。然而实际微元受力并不均匀,受力区域边缘的形变较小,对模拟结果进行修正,可以得到更为平滑的啁啾光纤光栅反射谱。

如果光栅受到横向的局部应力,则受力区域长度为 l 。假设沿啁啾光纤光栅的长度方向将光栅分成 600 等分,则每段长度微元的长度为 $\Delta L = 25\ \mu\text{m}$,有 $N=l/\Delta L$ 段会受到局部横向压力,并产生相应的位移,则传输矩阵公式(4)演化为

$$\begin{bmatrix} R(-L/2) \\ S(-L/2) \end{bmatrix} = \mathbf{T}^1 \cdots \mathbf{T}^{N-1} \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix}^{\text{STRESS}} \times \mathbf{T}^{N+1} \cdots \mathbf{T}^N \cdot \begin{bmatrix} R(L/2) \\ S(L/2) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

根据传输矩阵法可以模拟出受到局部横向压力的啁啾光纤光栅的反射谱。当受力大小相同时,改变施加应力重物的半径,将会改变受力光纤微元的长度,因此反射谱的透射窗口深度也会不同。同样对不同位置的区域施加应力,将会改变反射谱中透射窗口的波长位置。

由图 2(a)可以看出当受力位置相同时,啁啾光纤光栅反射谱的透射窗口深度随着受力区域长度的增加而增大。如图 2(b)所示,当对光栅的不同区域施加相同大小横向应力时深度相同,相邻两个位置的分辨率为 $675\ \mu\text{m}$,最小透射窗口的分辨率为 $0.4\ \text{nm}$ 。如果受力位置过于集中,在大小相同、受力区域相同的情况下,光栅反射谱的透射窗口深度受到相互间的影响而大小不同。只有当受力位置间隔大于光栅可分辨区

域时,透射窗口深度才会均匀。反之在不同的位置上施加大小相同、受力区域长度相同的应力,则啁啾光纤

光栅反射谱透射窗口深度将会发生周期性变化。对于写制多波长的光纤光栅,改变不同相位具有理论意义。

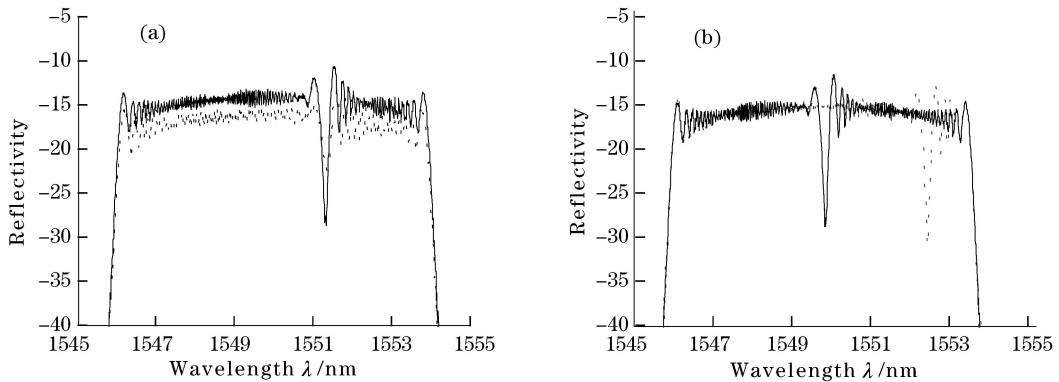


图 2 局部受力均为 100 N,区域长度不同(a)及区域长度相同但受力位置不同(b)的啁啾光纤光栅反射谱 实线为受力区域较大的啁啾光纤光栅反射谱,虚线为受力区域较小的啁啾光纤光栅反射谱

Fig. 2 Reflection spectra of CFG with transverse local force, local forces both of 100 N, but different length of forced regions (a) and the same forced regions, but different location of transverse force (b) solid line for the transverse forced CFG reflection spectrum with larger strained length, and the dotted line for that with smaller strained length

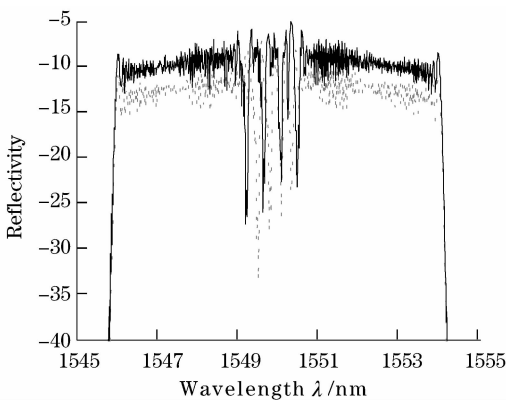


图 3 受到四个大小均为 100 N 受力区域相同的横向局部应力作用的啁啾光纤光栅发射谱。实线表示四个受力点的位移间隔为 675 μm,虚线表示受力点间隔为 300 μm

Fig. 3 Reflection spectra of the CFG, with four forces of 100 N imposed on the grating, and the same forced region, but different displacement interval of each stress point. Solid line for 675 μm and dashed line for 300 μm

4 实验装置与结果讨论

设计实验如图 4 所示,宽带光源发出的光经过啁啾光栅的反射,进入光谱分析仪(OSA)。将啁啾光纤光栅固定在表面光滑的平台上。为了对光栅进行保护,在光栅表面涂一层硅胶。当半径为 0.5 mm 的圆柱形轻质铜丝在啁啾光纤光栅的不同位置移动时,将会在啁啾光纤光栅的反射谱上随之产生不同位置的透射窗口。钢丝所受的重力完全施加光栅的横

向位置上。改变不同的施力位置和改变砝码的大小,可以得到不同的啁啾光纤光栅发射谱,如图 5 所示。

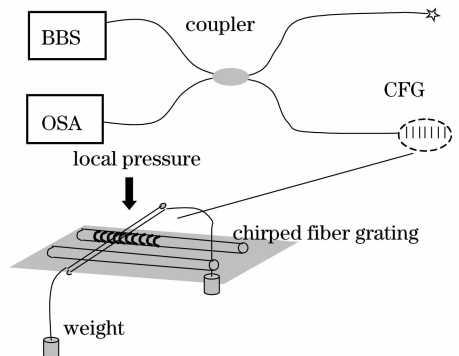


图 4 啁啾光纤光栅横向局部受力实验结构示意图

Fig. 4 Scheme of the chirped fiber grating with transverse local pressure

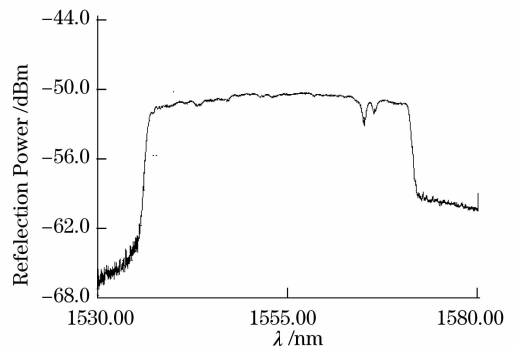


图 5 啁啾光纤光栅的反射谱

Fig. 5 Reflection spectrum of the CFG

实验中采用新加坡南洋理工大学啁啾模版写制的带宽为 35nm 的啁啾光纤光栅,带宽范围在 1537~

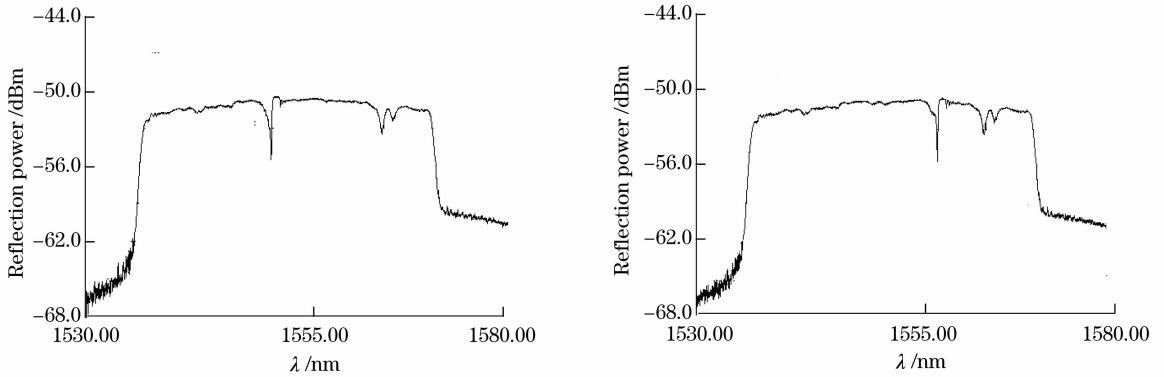


图 6 在不同位置受力时啁啾光纤光栅的反射谱

Fig. 6 Reflection spectra of the CFG with transverse local pressure imposed on fiber in different locations

1572 nm。图 6 为在不同位置某一点受到相同的横向压力时的啁啾光纤光栅反射谱,受力位置间隔为 1 cm。

当圆柱型重物沿着光纤的轴向逐渐移动时,可以看出反射谱中透射窗口位置也随之移动,与模拟的结果相一致,如图 7 所示。对上述反射谱进行分析,可以看出应力作用点与反射谱中透射窗口的中心波长漂移成良好的线性关系,线性度为 0.9986。

图 8 为在不同位置的某两点同时受到相同的局部横向应力的反射谱,受力位置间隔不同。

对图 8 的多点受力的啁啾光纤光栅反射谱进行分析,可以得到反射谱的透射窗口中心波长位置成复杂的非线性关系。通过对受力位置、区域长度以

及大小的模拟计算可以得到不同透射窗口的宽带啁啾光纤光栅反射谱。从而可以制作出波长可调谐的带通滤波器。

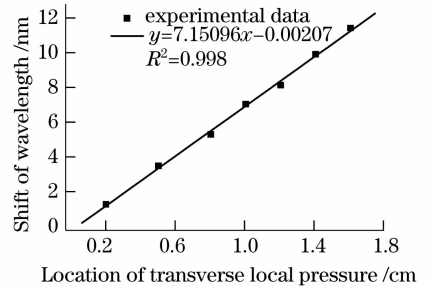


图 7 反射谱凹陷的中心波长与应力作用点之间的关系曲线
Fig. 7 Relationship curve of the narrow transmission window and the location of the transverse pressure

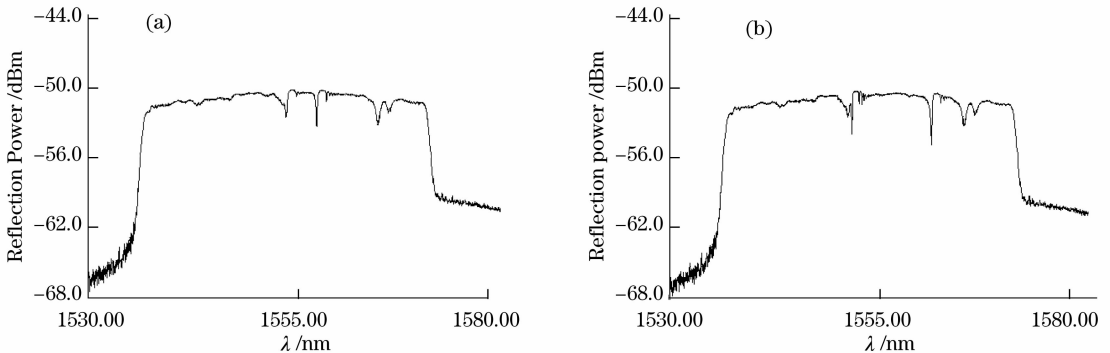


图 8 受力位置间隔不同受力大小相同的啁啾光纤光栅反射谱。(a) 间隔为 0.6 cm; (b) 间隔为 1.6 cm
Fig. 8 Reflection spectra of CFG with the same displacement interval of each stress point
(a) Interval of 0.6 cm; (b) interval of 1.6 cm

5 结 论

通过对啁啾光纤光栅施加局部横向压力,使啁啾光栅的反射谱中形成了透射窗口。透射窗口的位置和透射深度可以通过改变施加局部应力的位置、大小和施力区域的大小实现调谐,来制作出波长可调谐的单波长或者多波长带通滤波器。

参 考 文 献

- 1 Nam Quoc Ngo. Design of an optical temporal integrator based on a phase-shifted fiber Bragg grating in transmission [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(20): 3020~3022
- 2 R. Lavrence. Transmission filters with multiple flattened passbands based on chirped moire gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**: 1283~1285
- 3 Fan Wei, Chen Bai, Li Xuechun *et al.*. Stress-induced single polarization phase-shifted DFB fiber laser [J]. *Acta Optica*

- Sinica*, 2002, **22**(5): 568~571
- 范 薇, 陈 柏, 李学春 等. 应力所致单偏振相移分布反馈光纤激光器[J]. *光学学报*, 2002, **22**(5): 568~571
- 4 D. Uttamchandani, A. Othonos. Phase shifted Bragg gratings formed in optical fibres by post-fabrication thermal processing [J]. *Opt. Commun.*, 1996, **127**: 200~204
- 5 C. J. S. de Matos, P. Torres, L. C. G. Valente *et al.*. Fiber Bragg grating characterization and shaping by local pressure[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(8): 1206~1211
- 6 R. B. Wagreich, W. A. Atia, H. Singh *et al.*. Effects of diametric load on fibre Bragg gratings fabricated in low birefringent fibre[J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(13): 1223~1224
- 7 A-Ping Zhang, Bai-Qu Guan, Xiao-Ming Tao *et al.*. Experimental and theoretical analysis of fiber Bragg gratings under lateral compression[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **206**: 81~87
- 8 R. Gafsi, M. A. El-Sherif. Analysis of induced-birefringence effects on fiber Bragg gratings[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2000, **6**: 299~323
- 9 P. Torres, L. C. G. Valente. Spectral response of locally pressed fiber Bragg grating[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **208**: 285~291
- 10 Liang Ming, Qian Jinren. An experimental investigation of fiber Bragg grating transverse load sensitivity [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2004, **34**(1): 50~54
- 梁 明, 钱景仁. 光纤 Bragg 光栅横向负载敏感特性的实验研究 [J]. *中国科技技术大学学报*, 2004, **34**(1): 50~54
- 11 Tu Qinchang, Zhang Weigang, Sun Lei *et al.*. Study on transversal stain fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12): 1508~1512
- 涂勤昌, 张伟刚, 孙 磊 等. 光纤布拉格光栅横向应变特性的研究 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(12): 1508~1512
- 12 Wu Fei, Li Lixin, Li Yaping *et al.*. Study of fiber Bragg grating characterization by transverse force to a small grating section[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(11): 1270~1273
- 吴 飞, 李立新, 李亚萍 等. 光纤 Bragg 光栅横向局部受力特性的研究 [J]. *光电子 • 激光*, 2005, **16**(11): 1270~1273
- 13 Yoji Okabe, Ryohei Tsuji, Nobuo Takeda. Application of chirped fiber Bragg sensors for identification of crack locations in composites[J]. *Composites: Part A*, 2004, **35**: 59~65
- 14 Meng Jiang, Weigang Zhang, Long Jin *et al.*. Fabrication of temperature-insensitive chirped fiber grating pressure sensor. Conference on Advanced Sensor Systems and Applications III [C]. *SPIE*, 2007, **6830**: 83018~83018
- 15 Meng Jiang, Weigang Zhang, Qinchang Tu. Reflection spectra of fiber Bragg gratings in quadratic strain field[J]. *Optoelectronics Letters*, 2006, **2**(6): 419~421
- 16 Liu Changjun, Zhang Weigang, Jiang Meng *et al.*. Study on self-induced chirping for fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1671~1674
- 刘长军, 张伟刚, 姜 萌 等. 光纤布拉格光栅自致啁啾效应的研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1671~1674
- 17 Lu Shaohua, Xu Ou, Dong Xiaowei *et al.*. Analysis for the reflective spectrum characteristics of chirped phase-shifted fiber gratings[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 577~581
- 鲁韶华, 许 鸥, 董小伟 等. 啁啾相移光纤光栅的反射谱特性 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 577~581